doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2023.03.007

# 水溶性气溶胶对自由空间量子通信性能影响①

张秀再②\*\*\* 吴悦维\*\*\* 周丽娟\*\* 翟梦思\*\* 董千恒\*\*

(\*南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044) (\*\*南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044)

(\*\*\* 南京信息工程大学长望学院 南京 210044)

摘要为了研究水溶性气溶胶对量子通信的影响,本文根据水溶性有机碳(WSOC)的复折射率及Mie 散射理论得到其消光效率因子,分析了水溶性气溶胶粒子质量浓度对量子通信链路衰减、信道容量、信道生存函数以及信道误码率的影响并进行了仿真实验。结果表明,当传输距离为8km,水溶性气溶胶粒子质量浓度分别为1.5µg/m<sup>3</sup>和6.5µg/m<sup>3</sup>时,对应的链路衰减、信道容量和信道误码率分别为0.506 dB/km和2.193 dB/km、0.622 bit/s和0.314 bit/s、0.0055和0.0099;当水溶性气溶胶粒子浓度为4µg/m<sup>3</sup>,传输距离分别为4km和10km时,对应的信道容量保真度分别为0.82和0.45。实际进行量子通信时,应根据水溶性气溶胶粒子的浓度来调整各项性能参数以保证通信正常进行。 关键词量子通信;水溶性气溶胶;链路衰减;信道容量;比特翻转信道;信道保真度;信道误码率

### 0 引言

1984年,美国 IBM 公司的科学家提出了第一个 量子密钥分配协议——BB84 协议,使量子通信的研 究从理论走向现实<sup>[1]</sup>。自此,全球各国深入展开了 对量子通信应用的探索研究,迅速推动量子通信技 术步入了蓬勃发展的时代。为进一步提高量子通信 的可靠性,众多学者就大气中各种成分对量子信号 传输的影响展开了研究。文献[2]研究了煤烟凝聚 力子对自由空间量子通信性能影响,从理论的角度 提供了确保煤烟环境下通信正常进行的调整方法。 文献[3]研究了降雪对地表附近自由空间量子信道 的影响,为降雪情况下量子通信的正常进行提供了 参考依据。文献[4]研究了黑炭气溶胶对星地量子 通信链路性能的影响,研究结果表明,应适当调整相 关策略及参数以减小黑碳气溶胶对量子通信链路产 生的影响。但至今仍未有学者聚焦水溶性气溶胶对 自由空间量子通信性能的影响。

大气气溶胶中的部分有机碳具有一定的吸光能力,而水溶性有机碳(water-soluble organic carbon, WSOC)则是其中的重要组成部分。WSOC 的光吸收可贡献气溶胶总吸收的 10% 左右,故而可以通过对 WSOC 浓度和光学性质的研究来表征水溶性气溶胶<sup>[5]</sup>。尚玥等人<sup>[6]</sup>研究发现在 365 nm 处的光吸收系数与 WSOC 的质量浓度息息相关。任丹阳等人<sup>[7]</sup>使用 IMPROVE 公式研究了大气气溶胶中不同组分的消光系数。姚青等人<sup>[8]</sup>研究了气溶胶中不同外溶性物质的消光特性。由此可见,研究水溶性气溶胶的消光特性及其在自由空间对量子通信各项性能的影响对提高量子通信的可靠性有实质性的作用。

本文忽略大气中其他物质,仅考虑水溶性气溶 胶对自由空间量子通信性能的影响,以 WSOC 的光 学特性表征水溶性气溶胶的光学特性,研究水溶性

① 国家自然科学基金(11504176,61601230)和 江苏省自然科学基金(BK20141004)资助项目。

② 男,1979年生,博士,副教授;研究方向:量子通信技术;E-mail:xz\_zhang@nuist.edu.cn。 (收稿日期:2022-01-27)

气溶胶的消光系数与粒子质量浓度之间的关系,分 析量子信道链路衰减的变化并进行仿真模拟;针对 比特翻转信道,分别建立粒子浓度与信道容量及保 真度之间的定量关系,并进行仿真模拟;分析信道误 码率在粒子浓度和传输距离影响下的变化,为保证水 溶性气溶胶影响下量子通信的可靠性奠定理论基础。

1 实验原理

#### 1.1 链路衰减因子

典型气溶胶粒子均可看作球形粒子,可采用 Mie 散射理论对其散射特性进行分析<sup>[9]</sup>。水溶性气 溶胶属于典型气溶胶中的一种,因此本文将采用 Mie 散射理论分析水溶性气溶胶的光学特性。

水溶性气溶胶粒子的尺度参数可表示为[10]

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda} \tag{1}$$

式中, x 为粒径参数; r 为水溶性气溶胶粒子的半径, 单位为  $\mu$ m;  $\lambda$  为入射光的波长, 单位为  $\mu$ m。

水溶性气溶胶的尺寸分布函数可满足对数正态 分布,其表达式为

$$N(r) = \frac{\mathrm{d}N_i(r)}{\mathrm{d}r} = \frac{N_i}{\sqrt{2\pi r} \mathrm{lg}\sigma_i \mathrm{ln}10} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\mathrm{lg}r - \mathrm{lg}r_i}{\mathrm{lg}\sigma_i}\right)\right]$$
(2)

式中,*r<sub>i</sub>* 是组分*i*的模半径,*σ<sub>i</sub>* 是普分布宽度,*N<sub>i</sub>* 是 组分*i* 的粒子数浓度。尺度谱参数的典型值如表1 所示<sup>[11]</sup>。

表1 常见气溶胶的尺度参数典型值

参数	Oceanic	Dust-like	Soot	Water-soluble
r <sub>i</sub> ∕µm	0.3000	0.5000	0.0118	0.0500
$\sigma_{_i}$	2.5100	2.9900	2.0000	2.9900

水溶性有机物对光具有较强的吸收能力,因此 在通信过程中就不可避免地需要考虑水溶性气溶胶 对能量造成影响而导致的不同程度的衰减。水溶性 气溶胶粒子的消光系数<sup>[12]</sup>可表示为

$$k_{\text{ext}} = \int_{0}^{\infty} Q(\lambda, r) \, \pi r^{2} N(r) \, \text{dr} = \int_{0}^{\infty} \frac{3Q(\lambda, r)}{4\rho r} C(r) \, \text{dr}$$
(3)

式中, $Q(\lambda,r)$ 为消光效率因子<sup>[12]</sup>;r为粒子半径, $\lambda$ 为激光波长; $Q(\lambda,r)\pi r^2$ 为半径为r的粒子消光面积(m<sup>2</sup>);N(r)为半径为r的粒子浓度; $\frac{3Q(\lambda,r)}{4\rho r}$ 为半径为r的粒子单位质量消光面积(m<sup>2</sup>/g);C(r)为半径为r的粒子质量浓度。

消光效率因子  $Q(\lambda, r)$ 表达式为

$$Q(\lambda, r) = \frac{2}{x^{2}} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(a_{n} + b_{n})$$
(4)

式中,x 为粒径参数;n 为散射次数; $a_n$  和  $b_n$  为 Mie 散射系数<sup>[13]</sup>;Re( $a_n + b_n$ )表示  $a_n + b_n$  的实部。

由国际气象学与大气物理学协会提出的大气气 溶胶标准辐射大气模型,可以得到各类型气溶胶粒 子的复折射率<sup>[14]</sup>,水溶性气溶胶粒子的复折射率如 表2所示。

表 2 4 种类型气溶胶粒子的复折射率

波长/nm	Oceanic	Dust-like	Soot	Water-soluble
400	1. 385 – 9. 9 × 10 <sup>-9</sup> $i$	1. 53 – 8. 0 × 10 <sup>-3</sup> $i$	1. 75 – 4. 6 × 10 <sup><math>-1</math></sup> <i>i</i>	1. 53 – 5. $0 \times 10^{-3}i$
488	1. 382 – 6. 4 × 10 <sup>-9</sup> i	1. 53 – 8. 0 × 10 <sup>-3</sup> i	1. 75 – 4. 5 × 10 <sup><math>-1</math></sup> <i>i</i>	1. 53 – 5. 0 × 10 <sup>-3</sup> $i$
550	1. 381 – 4. 3 × 10 <sup>-9</sup> i	1. 53 – 8. 0 × 10 <sup>-3</sup> i	1. 75 – 4. 4 × 10 <sup><math>-1</math></sup> <i>i</i>	1. 53 – 6. 0 × 10 <sup>-3</sup> $i$
694	1. 376 – 5. $0 \times 10^{-9}i$	1. 53 – 8. 0 × 10 <sup>-3</sup> i	1. 75 – 4. 3 × 10 <sup><math>-1</math></sup> <i>i</i>	1. 53 – 7. 0 × 10 <sup>-3</sup> $i$

由表2可知,不同波长下水溶性气溶胶的复折 射率均有所不同,本实验选取的λ=0.4 μm,其他波 长下水溶性气溶胶的复折射率计算方法皆与之相 同,本文不再一一赘述。当光信号在星地之间传输 时,由水溶性气溶胶导致的能量衰减可表示为<sup>[15]</sup>  $E = E_0 \exp(-k_{\text{ext}} \cdot d) \tag{5}$ 

式中,E为量子信号通过水溶性气溶胶传输后的能量; $E_0$ 为量子信号的初始能量;d为量子信号的传输距离。

对式(5)取对数,得到链路衰减因子:

— 293 —

 $L_{\rm att} = 10k_{\rm ext} \cdot \lg \cdot d \tag{6}$ 

#### 1.2 比特翻转信道信道容量

量子信号在星地之间传播时,不可避免地会受 到空气中各种粒子的影响,本文对比特翻转信道展 开研究,试探究水溶性气溶胶对信道容量的影响。 对于比特翻转信道来说用于计算的运算元由文 献[16]可得:

$$E_0 = \sqrt{p} \mathbf{I} = \sqrt{p} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$
  
$$E_1 = \sqrt{1 - p} \mathbf{X} = \sqrt{1 - p} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$
(7)

式中,1-p表示量子比特从10〉翻转为11〉的概率, X为量子算子,其中p为丢失1个光量子信号的概率,可表示为

$$p = \frac{E_0 - E}{E_0} = 1 - \exp(-k_{\text{ext}})$$
$$= 1 - 10^{-0.1 \cdot L_{\text{att}} \cdot d}$$
(8)

经过比特翻转信道后的量子系统可表示为[16]

$$\boldsymbol{\varepsilon}(\boldsymbol{\rho}_i) = (1 - p_i)\boldsymbol{\rho}_i + p_i \mathbf{X} \boldsymbol{\rho}_i \mathbf{X}$$
(9)

设量子系统信源{ $p_i$ , $\rho_i$ }, $i = 1, 2, 3, \dots, M p_i$ 表示字符  $\rho_i$ 出现的概率。输入字符 $\rho_1 = |0\rangle\langle 0|, \rho_2 = |1\rangle\langle 1|,$ 经过比特翻转信道后,量子系统可表示为

$$\varepsilon \left( \sum_{i} p_{i} \boldsymbol{\rho}_{i} \right) = \varepsilon \left[ p_{1} \rho_{1} + p_{1} \rho_{2} \right] = \left( \begin{matrix} p + p_{1} - 2pp_{1} & 0 \\ 0 & 1 - p - p_{1} + 2pp_{1} \end{matrix} \right)$$
(10)

此时的冯・诺伊曼熵  $s[\varepsilon(\rho)]$  为

 $S[\varepsilon(\sum_{i} p_{i} \rho_{i})] = -(p + p_{1} - 2pp_{1})\log(p + p_{1} - 2pp_{1}) - [1 - (p + p_{1} - 2pp_{1})]\log[1 - (p + p_{1} - 2pp_{1})]$ (11)

当 $p_1 = 0.5$ 时, $s[\varepsilon(\rho)]$ 取得最大值为1,因此比特翻转信道的信道容量为

$$C = s \left[ \varepsilon \left( \sum_{i} p_{i} \boldsymbol{\rho}_{i} \right) \right] - \sum_{i} p_{i} s \left[ \varepsilon \left( \boldsymbol{\rho}_{i} \right) \right]$$
$$= 1 - H(p')$$
(12)

式中,H(p')为二元香浓熵。

#### 1.3 比特翻转信道信道保真度

信道的保真度用于描述量子信号通过信道前后 状态的相似程度,保真度越高表示信号的准确度越 高,越接近初始状态。光信号经过信道传输后的保 真度<sup>[17]</sup>可表示为

$$F = tr\left(\sqrt{\boldsymbol{\rho}\left(\boldsymbol{\varepsilon}\left(\sum_{i} p_{i} \boldsymbol{\rho}_{i}\right)\right)^{2} \boldsymbol{\rho}}\right)^{0.5}$$
(13)

式中,tr()表示矩阵的迹;

由式(13)可得比特翻转信道的平均保真度为

$$F' = \left[ p_1 \left( p + p_1 - 2pp_1 \right) \right]^{0.5} + \left( 1 - p_1 \right)^{0.5} \cdot \left[ 1 - \left( p + p_1 - 2pp_1 \right) \right]^{0.5}$$
(14)

式中, $p_1$ 表示字符为 $|0\rangle$ 的概率。

#### 1.4 误码率

当光量子信号在大气中传输时,水溶性气溶胶 的部分特性会导致量子通信发生错误产生误码。量 子误码率表示接收到的误码率与总误码率的比值, 表达式为

$$R_{Q} = \frac{R_{e}}{R_{a}} \tag{15}$$

式中, $R_o$ 为由水溶性气溶胶引起的误码率; $R_a$ 为接收到的误码率; $R_a$ 为总误码率。

 $R_{e} = \eta n (1 - \alpha) \exp^{-4\eta n} + \alpha \eta n \exp^{-\eta M}$ (16) 式中, η 为光电探测器效率, n 为接收到的粒子数, n  $= \frac{n_{a}}{2} + n_{b}, 其中, n_{a} 表示背景噪声干扰的光子数, n_{b}$ 表示光电探测器的暗电流数值,  $M = 4n + \exp^{-k_{ext}d}$ 。 总比特率为

$$R_a = F_s R_r \left(1 - \exp^{-\beta \delta_\tau T_a \eta H_c}\right) \tag{17}$$

式中, $F_s$ 为筛选因子, $R_r$ 为发射脉冲重复率, $\beta$ 为脉 冲平均光子数, $\delta$ 为信道传输因子, $\delta = 10^{-0.1L_{au}\theta}$ , $\theta$ 表 示地面到卫星的天顶角, $\tau$ 为单光子俘获率, $H_c$ 为测 量因子, $T_a$ 为系统传输率。

根据 BB84 协议,各参数取值情况如表 3 所示。

表 3 各参数取值情况

)

η	n	$n_a$	$F_s$	$R_r$	$H_{c}$	β	au	$T_{a}$	
0.65	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-6</sup>	0.5	0.5	1	1	0.5	1	

2 仿真模拟

本文的研究过程中采用波长  $\lambda = 0.4 \mu m$  的光 量子信号仿真模拟水溶性气溶胶对链路衰减、信道 容量、信道保真度以及误码率的影响。在仿真过程 中,考虑到不同小节间的实际情况,为了确保仿真模 拟的准确性,特将表示字符为10〉概率的  $p_1$  设置为 0.5 以计算此时的信道容量,而在建立信道保真度 与水溶性气溶胶粒子浓度和传输距离之间的关系时  $p_1$  的取值通常较小,故取  $p_1 = 0.05$ 。

#### 2.1 水溶性气溶胶对链路衰减的影响

不计大气中其他其他物质对光信号的影响,则 链路衰减因子与水溶性气溶胶粒子浓度和传输距离 之间的关系如图 1 所示。由图可知,当传输距离保 持不变时,随着粒子浓度的增加,散射强度逐渐增 大,导致能量衰减速度增加,链路衰减因子呈上升趋 势,且在  $N_0 = 8 \ \mu g/m^3 \pi d = 10 \ km$ 时,链路衰减因 子达到最大,值为 3.37 dB/km;当粒子浓度一定时, 传输距离逐渐增加,链路衰减因子随之增大。当传 输距离为 3 km 时,粒子浓度从 0.5  $\mu g/m^3$ 增加至 4  $\mu g/m^3$ ,链路衰减因子从 0.063 dB/km 增加至 0.506 dB/km。当传输距离为 8 km 时,粒子浓度从 1.5  $\mu g/m^3$ 增加至 6.5  $\mu g/m^3$ ,链路衰减因子从 0.506 dB/km增加至 2.193 dB/km。由此可见,信号 在传输过程中随着传输距离与水溶性气溶胶浓度的 增加,链路衰减程度也在不断加深,量子通信的可靠性



便随之降低。因此,在实际通信过程中可以对粒子 浓度做出调整来确保通信正常进行。

#### 2.2 水溶性气溶胶对量子通信信道容量的影响

比特翻转信道的信道容量与水溶性气溶胶离子 浓度和传输距离之间的关系如图 2 所示。从图 2 可 以看到,当水溶性气溶胶粒子浓度一定时,传输距离 越大,信道容量的减小幅度越大;当传输距离不变 时,随着水溶性气溶胶粒子浓度的增大,粒子散射强 度逐渐增大,进而严重破坏量子相关性,信道容量呈 下降趋势。传输距离为 3 km 时,随着水溶性气溶胶 粒子浓度从 0.5 μg/m<sup>3</sup>增加至 4 μg/m<sup>3</sup>,信道容量从 0.906 bit/s 减小至 0.591 bit/s。传输距离为 8 km,随 着水溶性气溶胶浓度从 1.5 μg/m<sup>3</sup>增加至6.5 μg/m<sup>3</sup>, 信道容量从 0.622 bit/s 减小至 0.314 bit/s。由此可 见,水溶性气溶胶极大程度地影响着信道容量,在实 际通信过程中应调整粒子浓度以确保通信的可靠性。



#### 2.3 水溶性气溶胶对量子信道保真度的影响

取  $p_1$  = 0.05,信道保真度与水溶性气溶胶粒子 浓度和传输距离之间的关系如图 3 所示。从图 3 可 以看到,当传输距离保持不变时,随着粒子浓度的增 加,信道保真度呈减小的趋势;当粒子浓度一定时, 随着传输距离的增加,信道保真度逐渐降低,保真度 的最小值达到 0.437。随着粒子浓度逐渐增大,保 真度随传输距离的变化显著,粒子浓度为 4  $\mu$ g/m<sup>3</sup> 时,传输距离从 4 km 增加到 10 km,保真度从 0.82 减小至 0.45。由此可见,水溶性气溶胶粒子浓度越 高,其消光作用越强,量子信号输出后出现失真的可 能性越大,对保真度有一定影响。需要根据粒子浓度的高低来调整信道的带宽或改变光信号的发射成功率,提高量子传输的可靠性。



#### 2.4 水溶性气溶胶对误码率的影响

本文采用波长 λ = 0.4 μm 的光量子信号,在不 考虑大气中其他因素影响的情况下,水溶性气溶胶 粒子浓度、传输距离和星地量子通信链路系统误码 率之间的关系如图 4 所示。当传输距离大于 4 km、 粒子浓度大于 3.5 μg/m<sup>3</sup>时,信道误码率开始有较 明显的变化,且最大值达到 0.0148;当传输距离不 变时,随着粒子浓度的增加,误码率逐渐增大;当粒 子浓度保持不变时,随着传输距离的增加,误码率也 随之增加。当传输距离为6 km,粒子浓度从0.5 μg/m<sup>3</sup> 增加到 4 μg/m<sup>3</sup>时,误码率从 0.0048 增加至 0.0058;



当传输距离为8 km,粒子浓度从1.5 μg/m<sup>3</sup>增加到 6.5 μg/m<sup>3</sup>时,误码率从0.0055 上升至0.0099。由 此可见,水溶性气溶胶离子浓度对信道误码率也具 有一定的影响力。

## 3 结论

研究水溶性气溶胶对自由空间量子通信性能的 影响,根据 WSOC 的尺度谱分布,分析不同浓度的 水溶性气溶胶粒子的消光系数,并研究水溶性气溶 胶粒子与量子通信链路衰减之间的关系。针对比特 翻转信道,建立水溶性气溶胶粒子粒子浓度和传输 距离与比特翻转信道信道容量、信道保真度和信道 误码率之间的定量关系,并进行仿真模拟。仿真结 果表明,随着水溶性气溶胶粒子浓度及传输距离的 增大,链路衰减、信道容量、信道保真度及误码率都 有不同程度的变化;链路衰减和误码率呈上升趋势, 信道容量和信道保真度呈下降趋势。因此,在进行 量子通信时,可对各项性能参数进行调整以提供理 论参考,保证在该环境下的量子通信顺利进行。

#### 参考文献

- [1] 吴华,王向斌,潘建伟.量子通信现状与展望[J].中国
   科学:信息科学,2014,44(3):296-311.
- [2] 刘邦宇,张秀再,徐茜.煤烟凝聚粒子对量子卫星通信 性能的影响[J].光学学报,2020,40(3):175-182
- [3] 聂敏,王超旭,杨光,等.降雪对地表附近自由空间量子信道的影响及参数仿真[J].物理学报,2021,70
   (3):39-44.
- [4] 张秀再,翟梦思,周丽娟. 黑碳气溶胶对星地量子链路 通信性能的影响[J]. 光学学报,2021,41(11):1-9.
- [5] 郭子雍,阳宇翔,彭龙,等.广州地区不同粒径段大气 颗粒物中水溶性有机碳的吸光贡献[J].中国环境科 学,2021,41(2):497-504.
- [6] 尚玥,余欢,茅宇豪,等.南京北郊 PM\_(2.5)中有机组 分的吸光性质及来源[J].环境科学,2021,42(3): 1228-1235.
- [7] 任丹阳,周杨,吴冠儒,等.香港郊区站点冬季污染背 景下气溶胶消光特征及其与细颗粒物化学组成关系 [J].地球化学,2021,50(1):12-21.
- [8] 姚青,韩素芹,毕晓辉.天津2009年3月气溶胶化学组成及其消光特性研究[J].中国环境科学,2012,32

(2):214-220.

- [9] 马超,陈慧敏,齐斌,等.不同波长激光在典型气溶胶 粒子中的传输特性[J]. 兵工学报,2020,41(S2):249-256.
- [10] 张秀再,徐茜,刘邦宇,等.海洋气溶胶对自由空间量 子通信性能影响[J].光学学报,2020,40(20):188-195.
- [11] JOHNSON N D. Fundamentals of atmospheric radiation
   [J]. American Journal of Physics, 2007, 75(7): 671-672.
- [12] 鲁先洋. 典型区域大气气溶胶参数特性分析及其测量 方法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2017: 20-22.
- [13] 张合勇,赵卫疆,任德明,等. 球形粒子 Mie 散射参量的

Matlab 改进算法[J]. 光散射学报, 2018, 20(2): 102-110.

- [14] LIOU K N. An introduction to atmospheric radiation[M]. 2nd. Netherland: Elsevier,2002.
- [15] LEVONI C, CERVINO M, GUZZIR, et al. Atmospericaerosol optical properties: a database of radiative characteristics for different components and classes[J]. Applied Optics, 1997, 36(30): 8031-8041.
- [16] 刘琦,杨光,聂敏,等. 降雨对星地量子链路及隐形传态性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58 (7):1-12
- [17] 尹浩,韩阳. 量子通信原理与技术[M]. 北京: 电子工 业出版社, 2013: 63-66.

# Effect of water-soluble aerosol on the performance of free space quantum communication

ZHANG Xiuzai\* \*\* , WU Yuewei \*\*\* , ZHOU Lijuan \*\* , ZHAI Mengsi \*\* , DONG Qianheng \*\*

(\* Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology,

Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

(\*\* School of Electronics and Information Engineering,

Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

(\*\*\* Changwang School of Honors, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

#### Abstract

In order to study the influence of water-soluble aerosol on quantum communication, this paper obtains its extinction efficiency factor based on the complex refractive index and Mie scattering theory of water-soluble organic carbon (WSOC). The effect of the mass concentration of aerosol particles on the quantum communication link attenuation, channel capacity, channel survival function and channel error rate is analyzed and simulation experiments are carried out. The results show that when the transmission distance is 8 km and the mass concentration of water-soluble aerosol particles is  $1.5 \ \mu g/m^3$  and  $6.5 \ \mu g/m^3$ , the corresponding link attenuation, channel capacity and channel error rate are  $0.506 \ dB/km$  and  $2.193 \ dB/km$ ,  $0.622 \ bit/s$  and  $0.314 \ bit/s$ ,  $0.0055 \ and <math>0.0099$ , respectively. When the concentration of water-soluble aerosol particles is  $4 \ \mu g/m^3$  and the transmission distance is  $4 \ km$  and  $10 \ km$ , the corresponding channel capacity fidelity is  $0.82 \ and 0.45$ , respectively. Therefore, when actually performing quantum communication, various performance parameters should be adjusted according to the concentration of water-soluble aerosol particles to ensure normal communication.

Key words: quantum communication, water-soluble aerosol, link attenuation, channel capacity, bit-flip channel, channel fidelity, channel bit error rate